第64卷 第5期 天 文 学 报 Vol. 64 No. 5
2023年9月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Sept., 2023

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2023.05.001

基于暗物质粒子探测卫星的宇宙线直接探测研究*

袁 强[1,2†]

(1 中国科学院紫金山天文台暗物质与空间天文重点实验室 南京 210023)
(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

摘要 高能宇宙线的起源、加速和传播是重大的前沿科学问题, 回答该问题需要对宇宙线的能谱、各向异性以及各类高能天体电磁辐射进行精确观测. 通过空间粒子探测器对宇宙线各成分能谱的直接测量是研究宇宙线物理问题的重要手段. 中国于2015年底发射并持续运行至今的暗物质粒子探测卫星以其大接受度、高能量分辨率等特点, 在宇宙线直接探测方面取得了系列重要成果, 揭示出质子、氦核、硼碳和硼氧比例等宇宙线能谱的新结构, 为理解宇宙线起源等科学问题提供了新的依据. 介绍了暗物质粒子探测卫星的仪器设置、运行状况、科学成果及其物理意义.

关键词 空间天文, 宇宙线, 辐射机制: 非热, 粒子天体物理

中图分类号: P144; **文献标识码**: A

1 引言

宇宙线是来自外太空的高能量粒子, 主要包括各种带电原子核、少量的电子以及更加稀少的正电子和反质子等粒子. 宇宙线的发现可以追溯至上世纪初人们对空气电离度的研究. 以V. Hess为代表的一批科学家发现引发空气电离的源头和长久以来人们认为的地壳岩石放射性无关, 而应该来自地外空间, 从而拉开了对此类神秘“射线”长达一个多世纪研究的帷幕. 宇宙线和电磁波、引力波及中微子并称为4大天文观测信使, 它们在当前的多信使天文时代起着不可或缺的关键作用. 宇宙线起源于何种天体、它们是如何被加速到极端高能量的[1]、如何在宇宙空间中传播以及相互作用、又怎样影响了星系的物质和磁场演化等是当前宇宙线研究的前沿问题. 宇宙线还是研究新物理的重要甚至独特手段, 可以探索极高能量下的物理规律以及暗物质的粒子本质等重大基础科学问题.

宇宙线的实验探测一般分为两类: 空间(或高空)直接探测和地面间接探测. 空间卫星、探空火箭或高空气球搭载的探测器可以避免或很大程度上降低地球大气层的干扰, 从而对入射的宇宙线粒子物理参数直接进行测量, 称为直接探测. 能量足够高的宇宙线粒子可以在空气中引发级联簇射, 通过对簇射次级粒子的探测也可以获知入射粒子信息, 该方法称为间接探测. 直接和间接探测优势互补, 直接探测可以清楚地区分入射粒子种类, 但由于探测器尺寸限制无法测量到非常高的能量[2]; 间接探测可以延伸到很高的能段, 但成分鉴别能力较差. 两类实验联合将宇宙线粒子的能谱从准相对论

2023-05-19收到原稿

*国家自然科学基金项目(12220101003)及中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划(YSBR-061)资助

†yuanq@pmo.ac.cn

[1]宇宙线粒子的最高能量达到3×10^{20} eV[1], 比人造加速器的最大能量高了7个数量级.

[2]一方面是由于宇宙线粒子数目随能量增大而快速下降, 另一方面是能量越高的粒子在探测器中的簇射泄漏也越严重. 目前直接探测实验最高能量不到PeV.

能量测量至10^{20} eV的极高能量, 能量跨越十余个数量级, 流量跨越了30余个数量级. 分成分的能谱测量目前主要的进展还是来自于直接探测实验, 覆盖的能段从GeV到亚PeV.

直接探测实验主要采用两类技术方案: 磁谱仪和量能器. 通过带电粒子在磁场中的偏转, 磁谱仪可以准确测出粒子的动量(能量)并且可以区分正负电荷. 磁谱仪实验的典型代表有反物质和轻核天体物理探测载荷(Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics, PAMELA[2])以及阿尔法磁谱仪(Alpha Magnetic Spectrometer, AMS-02[3]). 量能器实验则通过厚靶物质将入射粒子"拦截"并记录其沉积下的能量. 对于正负电子和γ光子, 量能器实验可以达到很高的能量分辨率(可高达约1%), 不过对于宇宙线原子核, 由于强相互作用的涨落以及产生的大量"不可探测"粒子, 能量分辨率通常在百分之几十. 代表性的量能器实验有费米γ射线空间卫星(Fermi[4])、量能器电子望远镜(CALorimetric Electron Telescope, CALET[5])和国际空间站宇宙线能量质量探测器(Cosmic Ray Energetics And Mass for the International Space Station, ISS-CREAM[6]). 这些实验近年来取得了系列重要的进展, 揭示出宇宙线能谱的新结构[7–23].

中国于2015年12月17日发射了首颗空间天文卫星—暗物质粒子探测器(DArk Matter Particle Explorer, DAMPE[24–25]). DAMPE采用全吸收型电磁量能器方案, 主要致力于高能量分辨率正负电子、γ射线和宇宙线探测. 经过7 yr多时间的运行, 在宇宙线能谱测量、暗物质探测以及分数电荷粒子搜寻等研究方面取得了一系列成果[26–33]. 本文将综述DAMPE实验和分析的相关研究, 并着重介绍其在宇宙线直接探测方面取得的进展.

2 暗物质粒子探测卫星

2.1 仪器

DAMPE主要的目标是探测高能宇宙线粒子, 需要准确测量粒子的能量、电荷、方向以及识别不同的粒子类别. 整个探测器由4个子探测器构成, 分别为塑闪阵列探测器(Plastic Scintillator Detector, PSD)、硅阵列探测器(Silicon Tracker, STK)、锗酸铋量能器(BGO)和中子探测器(Neutron Detector, NUD). 探测器示意图如图1所示[25].

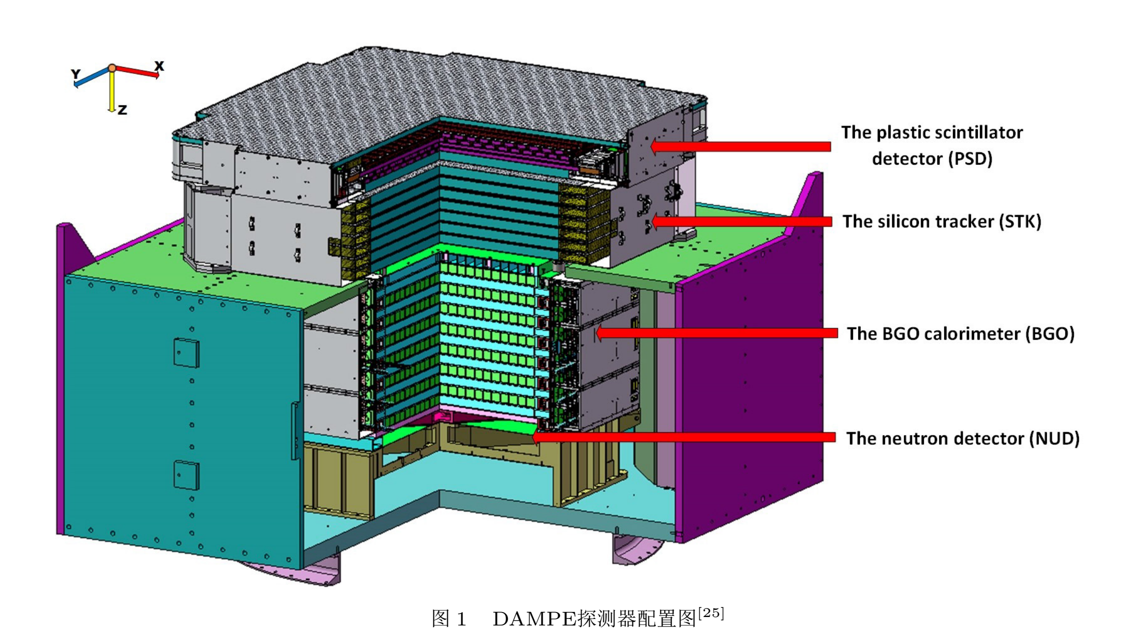


图 1 DAMPE探测器配置图[25]

Fig. 1 Cartoon plot of the DAMPE detector[25]

塑闪阵列探测器位于顶部, 由两大层垂直排布的塑闪条构成, 每一层又分为两小层, 由共计41根塑闪条平行排列, 上下两小层间保持水平移位0.8 cm, 从而可以有效减小探测器缝隙带来的效率损失[34]. 塑闪探测器有效探测面积为82.5×82.5 cm^2, 探测效率达到0.99999[35]. 塑闪探测器主要通过测量带电粒子的电离能损率来测量电荷, 其精度对碳和铁核分别达到0.18 e和0.30 e[36].

硅阵列探测器位于塑闪探测器下方, 由6大层12小层硅微条构成, 有效探测面积为76×76 cm^2. 每一大层的两小层硅微条垂直排列, 可以测量带电粒子的x和y坐标. 每小层分为16个条带, 每一条带包含768根硅微条, 其中一半为读出条. 整个硅探测器有73728路读出, 是DAMPE探测器读出通道最多的子探测器[37]. 硅探测器通过测量带电粒子的电离能损来记录粒子的径迹和电荷. 为了探测γ射线, 在硅探测器的第2、3、4层增加了1 mm厚的钨板以增大γ光子转换成正负电子对的几率. 硅探测器的位置分辨率优于50 μm[38], 通过γ射线点源观测得到的角分辨率在10 GeV和100 GeV处分别为0.4°和0.2°. 同时, 硅探测器对核电荷数$Z<8$的轻核素具有良好的电荷测量能力, 电荷分辨率优于塑闪探测器; 但对于较重的核素由于读出芯片饱和导致电荷测量能力下降.

再下方是DAMPE最主要的探测器—量能器[39], 由14层BGO晶体构成, 每层包含22根长条状晶体. 层与层之间垂直排列, 可以实现对入射粒子簇射的准立体成像. 每根晶体的两端耦合光电倍增管, 可以对信号进行二次独立测量. 为了扩大测量的动态范围, 每个光电倍增管由3个不同增益的打拿级读出[40–41]. 量能器有效探测面积为60×60 cm^2. DAMPE量能器的厚度很厚, 达到了32个辐射长度, 可以对能量高达10 TeV的电磁粒子进行全吸收型测量, 能量分辨率很高. 对于能量高于10 GeV的正负电子和γ光子, 能量分辨率优于1.5%[25, 42].

量能器还有一个重要作用是进行正负电子和质子的鉴别. 它们的绝对电荷均为1, 无法通过电荷测量区分. 不过由于它们相互作用属性不同, 在探测器中产生的簇射形态具有很大的差异. 正负电子以电磁相互作用为主, 簇射规则且紧致; 质子则是强相互作用和电磁作用混合, 簇射形态散乱无规. DAMPE厚量能器的设计可以有效呈现出二者簇射发展的差异, 达到很高的鉴别效果.

底部是中子探测器, 由掺硼的塑料闪烁体制成, 通过^{10}B俘获中子后产生^{7}Li和α粒子的过程记录入射粒子在量能器中产生的慢化次级中子[43–44]. 中子探测器的有效探测面积为61×61 cm^2, 其主要作用是辅助量能器进行正负电子和质子的区分, 原理是质子强相互作用过程会产生远多于正负电子电磁相互作用过程产生的次级中子. 中子探测器对TeV以上正负电子鉴别尤为重要, 因为此时正负电子和质子流量差异进一步增大, 单靠量能器鉴别效果已不是特别理想了.

2.2 科学目标

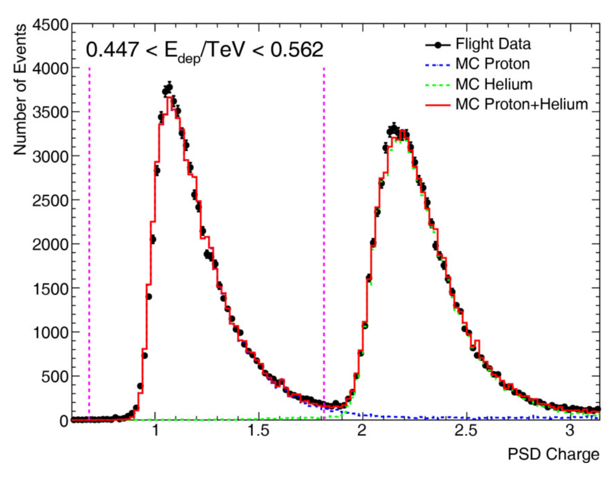
DAMPE卫星最主要的科学目标是通过高精度观测宇宙线正负电子和γ射线间接探测暗物质粒子. 得益于其超高的能量分辨率, DAMPE在揭示正负电子和γ射线精确能谱结构方面具有独特的优势, 可以探测暗物质湮灭或衰变产生的不同于常规天文过程的一些特殊结构, 例如单能γ射线线谱、尖锐正负电子能谱等. DAMPE可以探测宽能段的宇宙线粒子能谱、方向分布以及时间变化, 可以研究银河宇宙线的起源、传播、太阳系调制等宇宙线科学问题. DAMPE第3个科学目标是γ射线天文, 可以研究高能天体(如超新星遗迹、中子星、黑洞等)的相关物理问题.

3 宇宙线能谱直接测量

3.1 原初宇宙线核素能谱

宇宙线粒子中存在一系列相对高丰度的核素(以偶核为主), 主要包括质子、氦、碳、氧、氖、镁、硅、铁核等, 它们也是恒星核合成过程的高丰度产物, 被认为是直接来自于宇宙线的加速源, 称为原初宇宙线. 与此相反, 另有一些核素如锂、铍、硼、氟、钪、钛、钒、铬、锰核等在恒星核合成过程中产率很低, 但它们在宇宙线中相对丰度却较高, 一般认为这些核素是原初宇宙线碎裂产生, 称为次级宇宙线. 原初宇宙线的能谱反映了宇宙线的加速和传播的信息, 是研究宇宙线物理的重要观测量.

DAMPE卫星已在轨运行超过7 yr时间, 每天记录下约500万宇宙线事例, 其中绝大多数是质子, 其次是氦核. 利用DAMPE卫星数据, 科研人员开展了质子和氦核能谱的测量. 为了分别测量质子和氦核能谱, 准确进行质子和氦核的鉴别至关重要. DAMPE利用塑闪阵列探测器的电荷测量来进行质子和氦核的区分. 图2显示的是两个沉积能量段的粒子电荷分布, 两个峰代表质子和氦核. 低能量段粒子电荷分布很窄, 质子和氦核区分明显. 到高能量段, 由于反冲效应等因素影响使得电荷测量分布变宽, 质子和氦核的电荷分布重叠区域增大, 导致相互污染变得重要. 我们通过模拟数据得到的电荷分布模板去拟合观测数据, 给出其相互污染比例, 并在能谱测量中予以减扣.



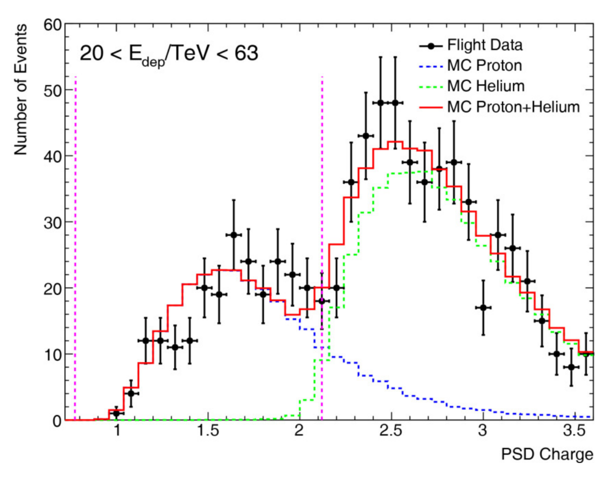


图 2 DAMPE塑闪探测器测得的质子和氦核在两个沉积能量($E_{\rm dep}$)段的电荷分布[27]. 黑色点为飞行数据, 蓝色和绿色虚线分别为Monte Carlo (MC)模拟的质子和氦核电荷分布, 红色实线为模拟质子和氦核总和分布. 这里的“电荷”由PSD能量转化而来, 并未归一到质子和氦核的真实电荷数值.

Fig. 2 PSD charge distributions of protons and helium nuclei in two deposited energy ($E_{\rm dep}$) bands measured by DAMPE[27]. Black points are flight data, blue and green dashed lines are Monte Carlo (MC) simulated PSD charge distributions of protons and helium, and the red solid line is the sum of MC protons and helium. Note that the PSD charge is converted from the measured energy without normalization to the real charge.

DAMPE卫星对原子核簇射的能量测量是不完整的, 有超过一半的入射能量被μ子、中微子等“不可见”成分带走. 沉积到探测器中的能量也由于强作用过程中的涨落而具有较大的不确定度, 因此逐事例重建入射能量误差较大. 我们一般是通过能量反卷积的过程来统计入射粒子能谱分布. 对于第i个能量段, 观测到的粒子数$N_{{\rm obs},i}$和入射粒子数$N_{{\rm inc},j}$的关系为

$$N_{{\rm obs},i} = \sum_j M_{ij} N_{{\rm inc},j}, \qquad (1)$$

其中M_{ij}是通过模拟得到的能量相应矩阵, 代表入射能量为第j个能量段的事例沉积能量落入第i个能量段的概率. 反解上式可以得到入射事例能量分布, 再除以探测器有效面积、曝光时间、能量区间宽度后可以得到入射粒子能谱.

图3为DAMPE实验测得的质子能谱[27](左上)、氦核能谱[28](右上)和质子+氦核能谱[33](下图, 其中左下图为和其他直接测量结果对比, 右下图为和间接测量结果对比). DAMPE的测量结果揭示出能谱的两个特征: 在能量约TeV处的变硬和数十TeV处的变软结构. 变硬结构已被此前多个实验观测到[8–11, 13, 17, 20], 而变软结构是DAMPE实验首次清晰地以高置信度测得. 能谱变硬或变软结构的拐折能量近似正比于粒子电荷, 对该结构的物理起源具有重要的预示意义. DAMPE进一步将质子+氦核能谱测量至约300 TeV能量, 同样揭示出

先变硬后变软的结构[33]. 有意思的是, 质子+氦核能谱在100 TeV以上呈现出再次变硬的迹象, 不过目前的数据显示这一结构的置信度不高, 需要未来更多的数据检验.

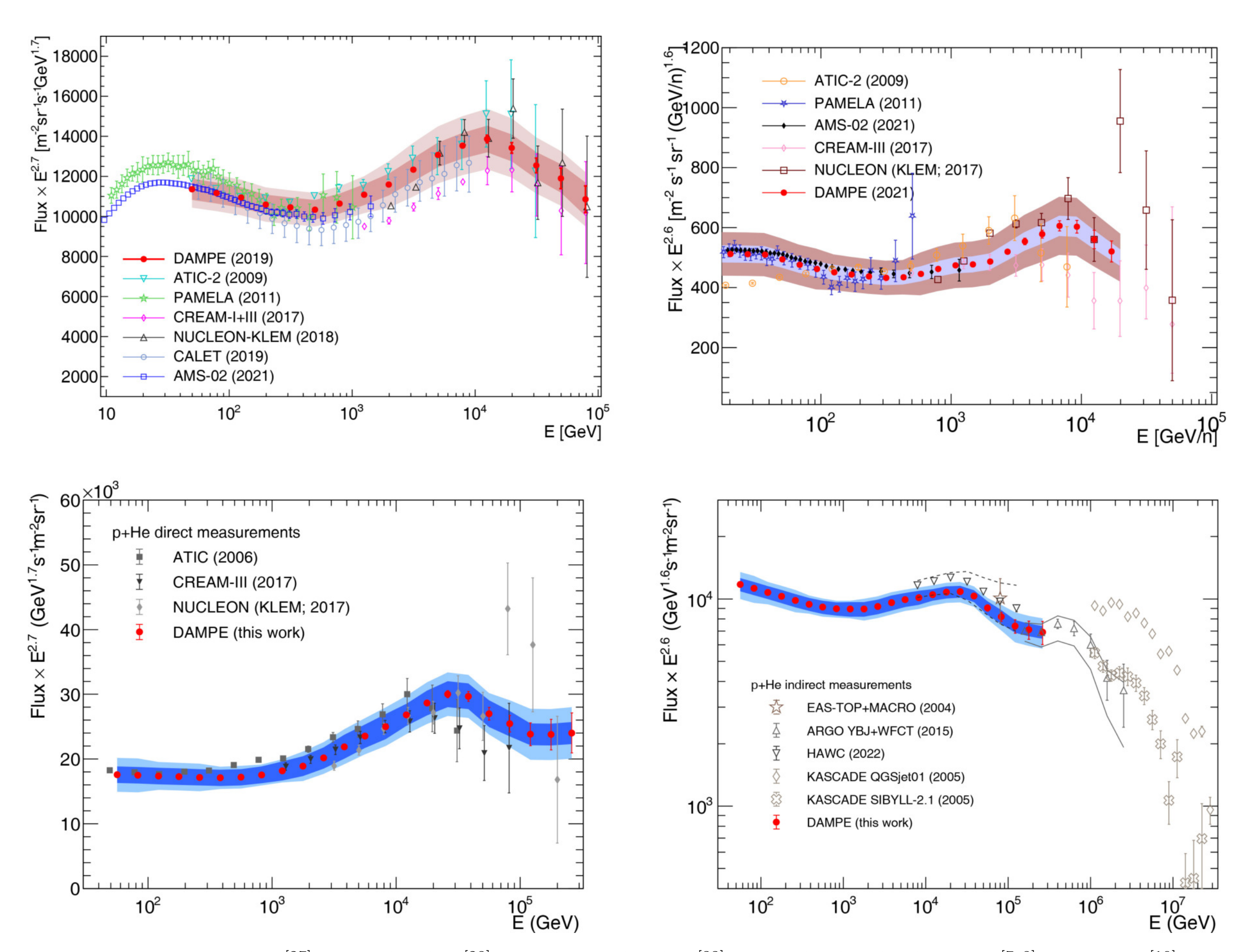


图 3　DAMPE质子能谱[27](左上)、氦核能谱[28](右上)和质子+氦核能谱[33](下图). 其他实验结果来自ATIC[7−8]、PAMELA[10]、AMS-02[45]、NUCLEON[20−21]、CALET[17]、CREAM[22]、ARGO-YBJ+WFCT[46]、HAWC[47]、KASCADE[48]和EAS-TOP+MACRO[49].

Fig. 3　Proton spectrum[27] (left up), helium spectrum[28] (right up), and proton plus helium spectrum[33] (bottom) measured by DAMPE. Other measurements are from ATIC[7−8], PAMELA[10], AMS-02[45], NUCLEON[20−21], CALET[17], CREAM[22], ARGO-YBJ+WFCT[46], HAWC[47], KASCADE[48], and EAS-TOP+MACRO[49].

3.2　次级/原初核素比例

次级宇宙线来自于宇宙线与星际介质相互作用. 相互作用可以发生在源附近, 也可以发生在传播过程中. 观测到的次级粒子能谱普遍比原初粒子能谱更软[14], 以及通过卫星实验观测到的全天弥散γ射线能谱和本地观测的原初宇宙线能谱指数接近[50]等事实表明, 相互作用应当主要发生在宇宙线传播过程中. 因此, 通过精确测量次级宇宙线和原初宇宙线的比例就可以获得宇宙线传播过程的重要信息.

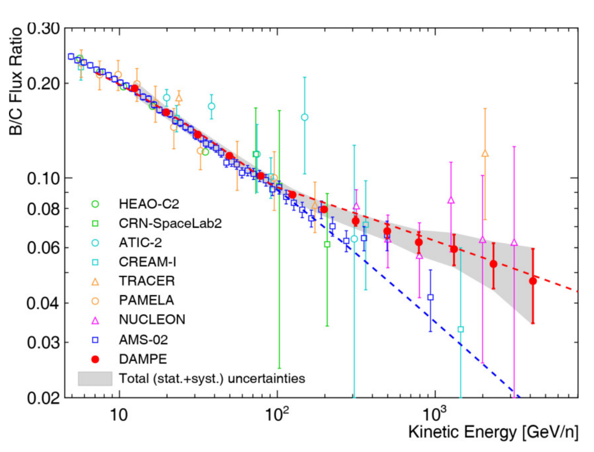
考虑一个简单的漏箱模型, 即将银河系简化成一个箱盒, 宇宙线被束缚在箱盒中, 以一定的速率泄露出去. 在稳态假设下, 次级粒子和原初粒子的能谱比例为

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{v\langle\rho\rangle\sigma}{m_{\rm H}} \left[\tau_{\rm esc}^{-1} + \tau_{\rm int}^{-1} + (\gamma\tau_{\rm s})^{-1}\right]^{-1} , \qquad (2)$$

其中v为宇宙线粒子速度(初级和次级粒子一样), $\langle\rho\rangle$为经历的平均星际介质密度, σ为产生次级粒子的截面, $m_{\rm H}$为氢原子质量, $\tau_{\rm esc}$为宇宙线逃逸时标, $\tau_{\rm int}$为相互作用时标, $\tau_{\rm s}$为放射性次级核素衰变时标, γ为次级粒子洛伦兹因子. 对于较轻的稳定核素, 相互作用截面较小, 上式方括号中起主导作用的是$\tau_{\rm esc}$项, 因此可以通过测量次级/原初核素比例来测量宇宙线的逃逸速率. 对于重核, $\tau_{\rm int}$通常不能简单忽略, 也会影响宇宙线粒子能谱.

硼碳比例(B/C)是测量较多的次级/原初粒子比例. 过去数十年来不断有各种实验对其进行测量, 总体上来说测量的能段偏低、精度有限. 这些测量表明B/C在10 GeV/n以上能段随着能量升高呈下降趋势, 下降行为基本上符合能量的幂律关系. 2016年AMS-02实验精确地测量了从约0.45 GeV/n到1.3 TeV/n的B/C比例, 发现在30 GeV/n以上的比例可以用$E^{-\delta}$的幂律函数拟合, 且$\delta = 0.333$精确地符合Kolmogorov星际介质湍流理论预期[12, 51]. 随后AMS-02更新的测量显示, 结合多种次级/原初粒子比例表明它们在高能段偏离单一幂律, 存在变硬的趋势, 但对于单个比例而言变硬的置信度却不够高[14, 45].

利用6 yr的观测数据, DAMPE实验对B/C和B/O的比例进行了精确测量, 覆盖能段从10 GeV/n到5.6 TeV/n[31], 相关结果如图4所示. 和以往实验相比, DAMPE的测量延伸到最高的能量, 在100 GeV/n以上能段的精度也最高. DAMPE实验以高置信度($> 4.4\sigma$)测得两个比例均在约100 GeV/n处存在拐折. 对这一结果最直接的解释是宇宙线扩散系数随能量的依赖关系在高能段存在拐折, 高能量的宇宙线传播速度比预想的更慢, 因此有更大的几率碎裂产生次级粒子[59]. 更为复杂的物理解释包括空间依赖的传播效应、在源附近的相互作用、邻近激波重加速以及宇宙线自激发湍流等[59].



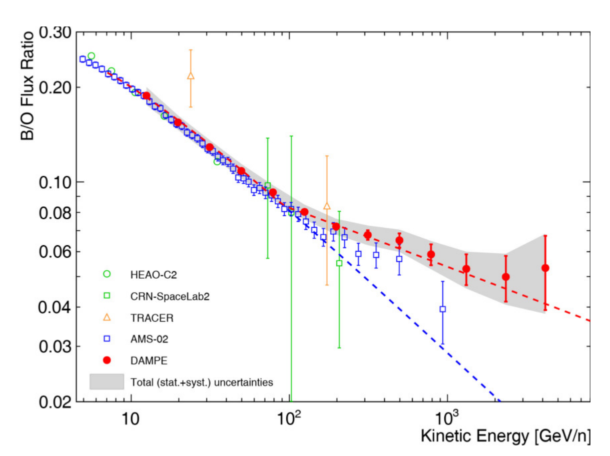


图 4 DAMPE硼碳(左图)和硼氧(右图)比例随能量的变化[31]. 其他实验结果来自HEAO-C2[52]、CRN-SpaceLab2[53]、ATIC-2[54]、CREAM-I[55]、TRACER[56]、PAMELA[57]、NUCLEON[58]和AMS-02[45].

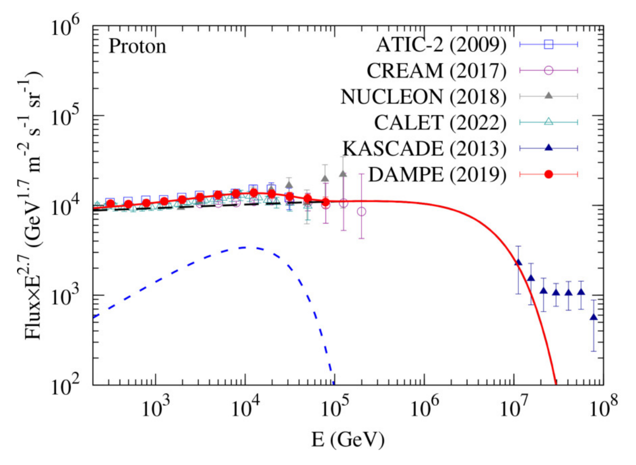
Fig. 4 The B/C (left panel) and B/O (right panel) ratios measured by DAMPE[31] and other experiments by HEAO-C2[52], CRN-SpaceLab2[53], ATIC-2[54], CREAM-I[55], TRACER[56], PAMELA[57], NUCLEON[58], and AMS-02[45].

4 银河宇宙线起源和传播物理

关于银河宇宙线的起源与传播, 人们已经建立起一个相对可靠的框架: 宇宙线被弥散分布于银河系内的极端高能天体(例如超新星遗迹、脉冲星风云、大质量星团、黑洞等)加速, 之后在随机星际磁场中以扩散方式传播并和途经的物质与磁场及辐射场发生相互作用, 随后进入太阳系并受到太阳风及其携带磁场的调制效应, 最终到达地球附近被探测器捕捉到[60]. 基于这个图像发展起来的模型可以解释大多数观测现象, 包括原初和次级宇宙线能

谱、弥散γ射线等. 然而, 包括DAMPE在内的多个实验揭示出的系列宇宙线能谱新结构表明这个图像可能需要进一步改进.

基于新的观测结果, 我们提出了一个简单的改进模型, 即引入一个邻近的、相对年轻(年龄约十万到百万年)的宇宙线源来解释这些新的观测现象. 图5为这个模型给出的质子和氦核能谱[61]. 在宽能段范围内, 大量的背景源贡献起着主导作用; 在1–100 TeV能段, 邻近源的贡献得以凸显, 从而在能谱上形成先变硬后变软的“鼓包”结构. 邻近源在低能处($\lesssim$ TeV)贡献被压低是由于低能宇宙线传播较慢而来不及传到地球附近, 高能处($\gtrsim$ 100 TeV)贡献也变低是由于该源的加速能力所限. 这个模型可以很简单、自然地解释宇宙线能谱观测结构, 而且预期在100 TeV以上能量粒子能谱还会再次变硬, 和DAMPE最新的质子+氦结果相符[33]. 这个模型还可以解释宇宙线大尺度各向异性的幅度和相位随能量的复杂变化行为[64–66]. 在约100 TeV以下能量, 宇宙线的各向异性由邻近源主导, 其相位取决于该源所处的方位(可能还会受到本地大尺度磁场的影响); 100 TeV以上能段各向异性由背景源主导, 相位由银河系中心指向反银心方向. 因此大尺度各向异性将在约100 TeV出现相位翻转, 和观测结果一致[67].



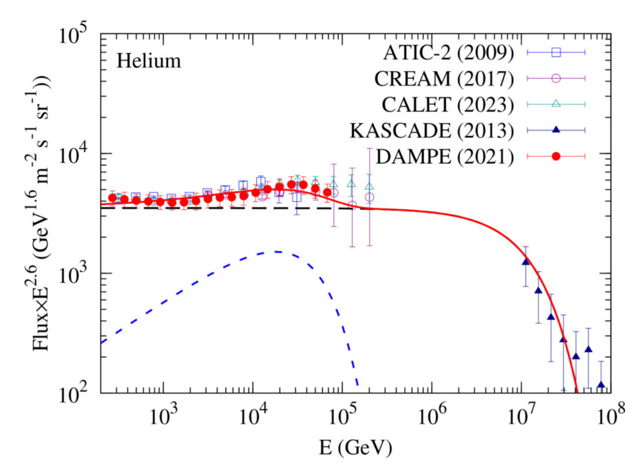


图 5 解释质子、氦核能谱拐折的背景源(黑色虚线)+邻近源(蓝色虚线)模型[61]. 红色实线为模型总谱. 观测数据参考文献为: DAMPE[27–28]、ATIC-2[8]、CREAM[22]、 NUCLEON[21]、CALET[19, 62]和KASCADE[63].

Fig. 5 A background (black dashed line) plus nearby source (blue dashed line) model to account for spectral breaks of protons and helium nuclei[61]. The red solid line shows the total model spectrum. Observational data are from DAMPE[27–28], ATIC-2[8], CREAM[22], NUCLEON[21], CALET[19, 62], and KASCADE[63].

5 总结

宇宙线能谱的直接测量是研究宇宙线物理的重要手段. DAMPE实验借助其高能量分辨率和相对大的有效探测面积, 在宇宙线能谱测量方面取得了一系列重要成果, 精确测量了质子、氦核、质子+氦、硼碳和硼氧比例等在宽能段的能谱, 发现新的拐折结构, 为理解宇宙线起源和传播物理提供了重要数据. 目前DAMPE卫星仍然持续在轨稳定运行, 探测器状态良好, 关于其他宇宙线核素的分析也在进行中. 此外, 我国也在积极开展下一代的空间高能粒子直接探测实验预研, 包括将安置在中国空间站上的高能辐射探测设施(High Energy Radiation Detection facility, HERD[68])、甚大面积γ射线望远镜(Very Large Area gamma-ray Space Telescope, VLAST[69])等. 通过这一系列观测设施, 人们有望准确测量宇宙线各个组分在超宽能段的能谱结构特征以及各向异性特征, 最终揭开宇宙线起源之谜.

致谢 暗物质粒子探测卫星得到中国科学院空间科

学战略先导专项的资助.

参 考 文 献

[1] Bird D J, Corbató S C, Dai H Y, et al. PhRvL, 1993, 71: 3401
[2] Menn W, Adriani O, Barbarino G C, et al. AdSpR, 2013, 51: 209
[3] Kounine A. IJMPE, 2012, 21: 1230005
[4] Atwood W B; Abdo A A, Ackermann M, et al. ApJ, 2009, 697: 1071
[5] Torii S, Shimizu Y, Hasebe N, et al. JASMA, 2007, 24: 120
[6] Seo E S, Moskalenko I V. AdSpR, 2014, 53: 1451
[7] Ahn H S, Seo E S, Adams J H, et al. AdSpR, 2006, 37: 1950
[8] Panov A D, Adams J H, Ahn H S, et al. BRASP, 2009, 73: 564
[9] Ahn H S, Allison P, Bagliesi M G, et al. ApJ, 2010, 714: L89
[10] Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. Science, 2011, 332: 69
[11] Aguilar M, Aisa D, Alpat B, et al. PhRvL, 2015, 114: 171103
[12] Aguilar M, Ali Cavasonza L, Ambrosi G, et al. PhRvL, 2016, 117: 231102
[13] Aguilar M, Ali Cavasonza L, Alpat B, et al. PhRvL, 2017, 119: 251101
[14] Aguilar M, Ali Cavasonza L, Ambrosi G, et al. PhRvL, 2018, 120: 021101
[15] Aguilar M, Ali Cavasonza L, Ambrosi G, et al. PhRvL, 2020, 124: 211102
[16] Aguilar M, Ali Cavasonza L, Allen M S, et al. PhRvL, 2021, 126: 041104
[17] Adriani O, Akaike Y, Asano K, et al. PhRvL, 2019, 122: 181102
[18] Adriani O, Akaike Y, Asano K, et al. PhRvL, 2020, 125: 251102
[19] Adriani O, Akaike Y, Asano K, et al. PhRvL, 2022, 129: 101102
[20] Atkin E, Bulatov V, Dorokhov V, et al. JCAP, 2017, 07: 020
[21] Atkin E, Bulatov V, Dorokhov V, et al. JETL, 2018, 108: 5
[22] Yoon Y S, Anderson T, Barrau A, et al. ApJ, 2017, 839: 1
[23] Choi G H, Seo E S, Aggarwal S, et al. ApJ, 2022, 940: 107
[24] Chang J. ChJSS, 2014, 34: 550
[25] Chang J, Ambrosi G, An Q, et al. APh, 2017, 95: 6
[26] Ambrosi G, An Q, Asfandiyarov R, et al. Nature, 2017, 552: 63
[27] An Q, Asfandiyarov R, Azzarello P, et al. SciA, 2019, 5: eaax3793
[28] Alemanno F, An Q, Azzarello P, et al. PhRvL, 2021, 126: 201102
[29] Alemanno F, An Q, Azzarello P, et al. ApJ, 2021, 920: L43
[30] Alemanno F, An Q, Azzarello P, et al. SciBu, 2022, 67: 679
[31] Alemanno F, Altomare C, An Q, et al. SciBu, 2022, 67: 2162
[32] Alemanno F, Altomare C, An Q, et al. PhRvD, 2022, 106: 063026
[33] Alemanno F, Altomare C, An Q, et al. 2023, arXiv:2304.00137
[34] Yu Y, Sun Z, Su H, et al. APh, 2017, 94: 1
[35] Xu Z L, Duan K K, Shen Z Q, et al. RAA, 2018, 18: 027
[36] Dong T, Zhang Y, Ma P, et al. APh, 2019, 105: 31
[37] Azzarello P, Ambrosi G, Asfandiyarov R, et al. NIMPA, 2016, 831: 378
[38] Ambrosi G, An Q, Asfandiyarov R, et al. APh, 2019, 106: 18
[39] Zhang Z, Zhang Y, Dong J, et al. NIMPA, 2015, 780: 21
[40] 郭建华, 蔡明生, 胡一鸣, 等. 天文学报, 2012, 53: 72
[41] Guo J H, Cai M S, Hu Y M, et al. ChA&A, 2012, 36: 318
[42] Zhang Z, Wang C, Dong J, et al. NIMPA, 2016, 836: 98
[43] 何明, 马涛, 常进, 等. 天文学报, 2016, 57: 1
[44] He M, Ma T, Chang J, et al. ChA&A, 2016, 40: 474
[45] Aguilar M, Ali Cavasonza L, Ambrosi G, et al. PhR, 2021, 894: 1
[46] Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, et al. PhRvD, 2015, 92: 092005
[47] Albert A, Alfaro R, Alvarez C, et al. PhRvD, 2022, 105: 063021
[48] Antoni T, Apel W D, Badea A F, et al. APh, 2005, 24: 1
[49] Aglietta M, Alessandro B, Antonioli P, et al. APh, 2004, 21: 223
[50] Ackermann M, Ajello M, Atwood W B, et al. ApJ, 2012, 750: 3
[51] Kolmogorov A N. DoSSR, 1941, 30: 301
[52] Engelmann J J, Ferrando P, Soutoul A, et al. A&A, 1990, 233: 96
[53] Swordy S P, Mueller D, Meyer P, et al. ApJ, 1990, 349: 625
[54] Panov A D, Sokolskaya N V, Adams J H Jr, et al. ICRC, 2008, 2: 3
[55] Ahn H S, Allison P S, Bagliesi M G, et al. APh, 2008, 30: 133
[56] Obermeier A, Ave M, Boyle P, et al. ApJ, 2011, 742: 14
[57] Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. ApJ, 2014, 791: 93

[58] Grebenyuk V, Karmanov D, Kovalev I, et al. AdSpR, 2019, 64: 2559
[59] Ma P X, Xu Z H, Yuan Q, et al. FrPhy, 2023, 18: 44301
[60] Strong A W, Moskalenko I V, Ptuskin V S. ARNPS, 2007, 57: 285
[61] Yue C, Ma P X, Yuan Q, et al. FrPhy, 2020, 15: 24601
[62] Adriani O, Akaike Y, Asano K, et al. PhRvL, 2023, 130: 171002
[63] Apel W D, Arteaga-Velázquez J C, Bekk K, et al. APh, 2013, 47: 54
[64] Liu W, Guo Y Q, Yuan Q. JCAP, 2019, 10: 010
[65] Qiao B Q, Liu W, Guo Y Q, et al. JCAP, 2019, 12: 007
[66] Qiao B Q, Luo Q, Yuan Q, et al. ApJ, 2023, 942: 13
[67] Amenomori M, Bi X J, Chen D, et al. ApJ, 2017, 836: 153
[68] Zhang S N, Adriani O, Albergo S, et al. SPIE, 2014, 9144: 91440X
[69] 范一中, 常进, 郭建华, 等. 天文学报, 2022, 63: 27

Direct Detection of Cosmic Rays with the Dark Matter Particle Explorer

YUAN Qiang[1,2]

(1 Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract The origin, acceleration, and propagation of high-energy cosmic rays is one of the most important questions in modern physics and astronomy. To fully uncover such a mystery, precise measurements of the energy spectra and anisotropies of cosmic rays, as well as multi-wavelength electromagnetic radiation from various types of energetic objects are required. The direct measurements of energy spectra of different species via particle detectors in space are an essential way to study cosmic ray physics. China launched the first space astronomical satellite, the Dark Matter Particle Explorer (DAMPE) in the end of 2015, which keeps operation in space for more than 7 years. The DAMPE has a relatively large acceptance and a high energy resolution, and has made important progresses in measuring the spectral structures of cosmic ray protons, helium nuclei, and boron-to-carbon and boron-to-oxygen ratios. These new measurements bring new insights in understanding the origin and propagation of cosmic rays. This paper reviews the instrumentation and operation of DAMPE, with an emphasis on its scientific results and physical implications in cosmic ray studies.

Key words space astronomy, cosmic rays, radiation mechanisms: non-thermal, astroparticle physics